

論文の内容の要旨

論文題目	Development of biomimetic soft robotic fish (生物模倣ソフト魚ロボットの研究開発)
学位 申請者	趙 文静

本論文は、ロボットの柔らかい構造体と周囲の流体の相互作用を考慮した数値シミュレーションに基づいた設計と制御を行い、高性能な生物模倣ソフト魚ロボットの実現を研究目的としている。まず高性能な生物模倣ソフト魚ロボットを開発するための基本的な設計手法を考え、それを実現するためのシミュレーションシステムの構築を行う。次に、有限要素法を用いて魚の形状、柔らかい構造、駆動などを模倣できるソフト魚ロボットのモデリングを行い、ロボットの推進運動と推進力の関係を解析している。これらのモデリング方法と解析方法を生物模倣ソフト魚ロボットの設計と制御への適用性を調べるために、シミュレーション結果と実際のロボットによる実験結果を比較しながら、検証と改善を行う。最後に、有効性が確認できたシミュレーションシステムを用いて、生物模倣ソフト魚ロボットの最適設計を行い、実際にロボットの試作と性能評価をし、ロボットの性能の向上ができることを実証している。

本論文は、以下に示す全 6 章で構成されている。

第 1 章は緒論である。生物模倣ソフト魚ロボットの研究背景と先行研究について解説し、その現状と課題をまとめ、本研究の目的を述べている。

第 2 章では高性能生物模倣ソフト魚ロボットを開発するための設計方法、手順とシミュレーションシステムについて述べる。従来の研究開発と異なって、柔らかい構造と流体の相互作用を活用することを前提としている。そのため、魚のような柔らかい構造、柔らかいアクチュエータによる分布駆動および流体などをモデリングする必要がある。また、柔らかい構造と流体の相互作用を考慮した解析により、魚の推進運動を実現させ、そして性能向上のための構造と制御入力の最

適化を行う必要がある。これらの要求を満たすために、本研究では有限要素法によるモデリング、流体を付加質量としてのモーダル解析および過渡応答解析により必要な推進運動の実現、そして流体と構造の連成解析により流体力の更なる活用ができるシミュレーションシステムを構築した。

第3章では第2章の方法を用いて、具体的な生物模倣ソフト魚ロボットについて、モデリングと解析を行う。このロボットでは、ソフトアクチュエータとして圧電繊維複合材料を用いている。まず、圧電繊維複合材料の入力電圧と発生応力の関係式を導き、この発生応力をロボットの柔らかい構造体に与えることでロボットの運動を解析できるようにした。そして、簡単な片持ちはりのモデルについて、数値シミュレーションと実験により本駆動モデルの有効性を確認した。次に、ロボットのモデルについて周囲流体を付加質量としてのモーダル解析を行い、流体中におけるロボットのモード形状と周波数を求めた。これらのモードの運動と魚の推進運動と比較して、推進運動を実現するためのモードを特定した。また、先に求めた駆動モデルを用いて、圧電繊維複合材料への入力電圧の周波数と推進運動の大きさの関係を調べた。さらに、流体と構造の連成解析により、ロボットの頭部が固定された状態における入力電圧の周波数と推進力および推進運動の大きさの関係を調べた。

第4章では第3章で解析した結果の有効性を調べるために、実際のロボットを用いて流体中のロボットのモード形状と推進運動の大きさ、ロボットの頭部が固定された状態における推進力および推進運動の大きさを計測した。その実験結果は第3章での解析結果に近いことが分かった。これによって、本研究で用いたモデリングと解析の方法の有効性が実証された。

第5章では上記の生物模倣ソフト魚ロボットのモデリングと解析の方法を用いて、新しい高性能のロボットを開発する。まずロボットの構造パラメータがある範囲の中で変化させ、解析によりロボットの推進運動の大きさを求め、大きな推進運動を実現できるロボットの構造パラメータを選定した。この結果に基づき、新しいロボットを設計し、試作した。試作したロボットを用いた評価実験の結果、高速度、高効率のロボットを開発することができた。

第6章は本研究で得られた成果をまとめ、今後の課題と展望について述べている。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 趙 文静

審査委員主査 明 愛国

委員 下条 誠

委員 前川 博

委員 青山 尚之

委員 田中 一男

本論文は、ロボットの柔らかい構造体と周囲の流体の相互作用を考慮した数値シミュレーションに基づいた設計と制御を行い、高性能な生物模倣ソフト魚ロボットの実現を研究目的としている。まず高性能な生物模倣ソフト魚ロボットを開発するための基本的な設計手法を考え、それを実現するためのシミュレーションシステムの構築を行う。次に、有限要素法を用いて魚の形状、柔らかい構造、駆動などを模倣できるソフト魚ロボットのモデリングを行い、ロボットの推進運動と推進力の関係を解析している。これらのモデリング方法と解析方法を生物模倣ソフト魚ロボットの設計と制御への適用性を調べるために、シミュレーション結果と実際のロボットによる実験結果を比較しながら、検証と改善を行う。最後に、有効性が確認できたシミュレーションシステムを用いて、生物模倣ソフト魚ロボットの最適設計を行い、実際にロボットの試作と性能評価をし、ロボットの性能の向上ができることを実証している。

本論文は、以下に示す全 6 章で構成されている。

第 1 章は緒論である。生物模倣ソフト魚ロボットの研究背景と先行研究について解説し、その現状と課題をまとめ、本研究の目的を述べている。

第 2 章では高性能生物模倣ソフト魚ロボットを開発するための設計方法、手順とシミュレーションシステムについて述べる。従来の研究開発と異なって、柔らかい構造と流体の相互作用を活用することを前提としている。そのため、魚のような柔らかい構造、柔らかいアクチュエータによる分布駆動および流体などをモデリングする必要がある。また、柔らかい構造と流体の相互作用を考慮した解析により、魚の推進運動を実現させ、そして性能向上のための構造と制御入力

適化を行う必要がある。これらの要求を満たすために、本研究では有限要素法によるモデリング、流体を付加質量としてのモーダル解析および過渡応答解析により必要な推進運動の実現、そして流体と構造の連成解析により流体力の更なる活用ができるシミュレーションシステムを構築した。

第3章では第2章の方法を用いて、具体的な生物模倣ソフト魚ロボットについて、モデリングと解析を行う。このロボットでは、ソフトアクチュエータとして圧電繊維複合材料を用いている。まず、圧電繊維複合材料の入力電圧と発生応力の関係式を導き、この発生応力をロボットの柔らかい構造体に与えることでロボットの運動を解析できるようにした。そして、簡単な片持ちはりのモデルについて、数値シミュレーションと実験により本駆動モデルの有効性を確認した。次に、ロボットのモデルについて周囲流体を付加質量としてのモーダル解析を行い、流体中におけるロボットのモード形状と周波数を求めた。これらのモードの運動と魚の推進運動と比較して、推進運動を実現するためのモードを特定した。また、先に求めた駆動モデルを用いて、圧電繊維複合材料への入力電圧の周波数と推進運動の大きさの関係を調べた。さらに、流体と構造の連成解析により、ロボットの頭部が固定された状態における入力電圧の周波数と推進力および推進運動の大きさの関係を調べた。

第4章では第3章で解析した結果の有効性を調べるために、実際のロボットを用いて流体中のロボットのモード形状と推進運動の大きさ、ロボットの頭部が固定された状態における推進力および推進運動の大きさを計測した。その実験結果は第3章での解析結果に近いことが分かった。これによって、本研究で用いたモデリングと解析の方法の有効性が実証された。

第5章では上記の生物模倣ソフト魚ロボットのモデリングと解析の方法を用いて、新しい高性能のロボットを開発する。まずロボットの構造パラメータをある範囲の中で変化させ、解析によりロボットの推進運動の大きさを求め、大きな推進運動を実現できるロボットの構造パラメータを選定した。この結果に基づき、新しいロボットを設計し、試作した。試作したロボットを用いた評価実験の結果、高速度、高効率のロボットを開発することができた。

第6章は本研究で得られた成果をまとめ、今後の課題と展望について述べている。

本論文は、高性能な生物模倣ソフト魚ロボットを開発するための基本的な設計手法を考え、それを実現するためのシミュレーションシステムの構築を行い、実際にロボットの設計・試作・実験による評価を通してその有用性を示した。その新規性と有用性は高く、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。